

セメント硬化体におけるレーザーアブレーション機構

Laser Ablation Mechanism on Cementitious Material

北海道大学大学院工学研究院 ○正 員 橋本勝文 (Katsufumi Hashimoto)

1. 研究の背景と目的

コンクリートにより構成される既存の社会基盤施設の効率的な材料・構造評価システムを実現するためには、監視・検査技術の改善が必要であることが強く求められている。コンクリートの材料特性や品質、あるいはコンクリート構造物の性能を評価するために、様々な非破壊検査が適用されている。一方で、コンクリート構造物の損傷評価や内部欠陥の推定については、有効な非破壊検査の現場実装に加え、浮き・はく離を伴うひび割れ性状に応じた評価と求められる。同時に、省人化・省力化を目的とした非接触あるいは遠隔での測定によりコンクリート内部の情報を取得可能な革新的な手法を並行して確立する必要がある。

コンクリート内部のひび割れの発生や欠陥箇所を定量的に評価することが可能な非破壊検査手法として、超音波領域の弾性波の励起や能動的なアコースティックエミッション（以下、AE）の検知に基づく試験方法が広く適用されている。コンクリートのひび割れや浮き・はく離などの損傷や欠陥を特定するために、コンクリートの内部欠陥を多次元的に視覚化する分析方法が多くの点検・診断の現場において運用化されている。しかしながら、コンクリートに実体波（P波やS波）や表面波（Rayleigh波やLamb波等）を含む弾性波を励起するには、通常、コンクリートの表面での鋼球打撃や加速度センサ等の圧電素子を被測定物に直接取り付けの上でファンクションジェネレータを用いて任意の周波数を持つ電圧信号を出力するような、接触法による非破壊検査が実施されることが多い。これらの手法は多くの場合、点検作業に時間的なコストを要する操作となる。

近年では、レーザー技術を用いたコンクリート内部の非破壊検査に関する技術開発が積極的に推進されている。特に、QスイッチYAGレーザーシステムにより、対象物表面に遠隔かつ簡便に高出力の衝撃を与えることができることに着目したコンクリート構造物に対する点検・診断技術が提案されている。特に、高エネルギーのパルスレーザーを照射することでアブレーションを発生させることで生じる波動現象を利用した非破壊検査に関する研究がなされている。

レーザーアブレーションの発生メカニズムを図-1に示す。これにより、高出力のパルスレーザーをコンクリート表面に照射することで、広い周波数範囲の弾性波を含む振動を励起できることが知られている²⁾。レーザー誘起弾性波のコンクリートの非破壊検査への応用によれば、レーザードップラー振動計との信号検出との組み合わせにより、非破壊検査の測定を目的とした完全なリモートセンシングが可能となる。

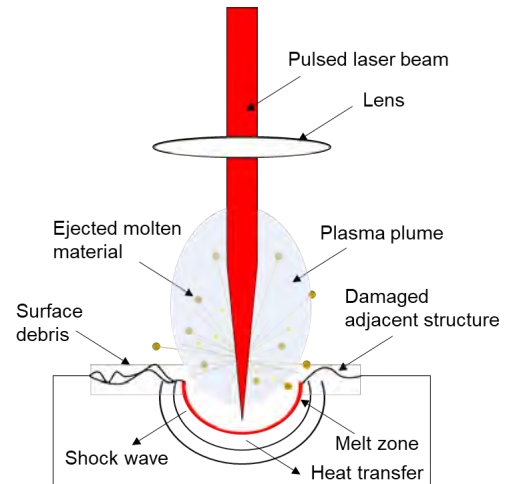


図-1 アブレーション機構の概念図

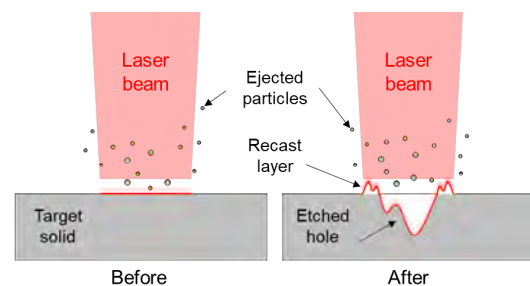


図-2 レーザー照射によるアブレーション痕の形成

図-1 および図-2 に示すように、コンクリート表面においてレーザーアブレーションを生じた場合、セメントペーストにパルス照射を繰り返すことでアブレーション痕を形成する。これにより、パルスレーザーが照射される表面積が変化し、単位面積当たりのパルスエネルギー（レーザーフルエンス）が低下する。

本研究では、パルスレーザーのエネルギーおよびスポット径によるフルエンスの変化が、レーザー照射の繰返しにより生じるアブレーション痕の形成と励起弾性波の波動特性に及ぼす影響を明らかとすることを目的とした。

2. 実験概要

白色セメントを用いて W/C が 0.27 のセメントペースト（W）を試験用の試料とした。直径 18.5mm、厚さ 5mm の円盤のサンプルを 50kHz 共振 AE センサにエレクトロニックワックスにより接着し、試料表面にパルスレーザーを照射した際に検出される AE 波を 1MHz のサンプリングレートで記録した。

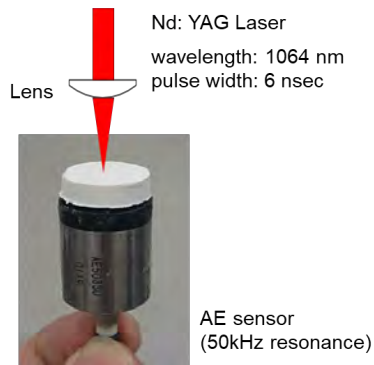
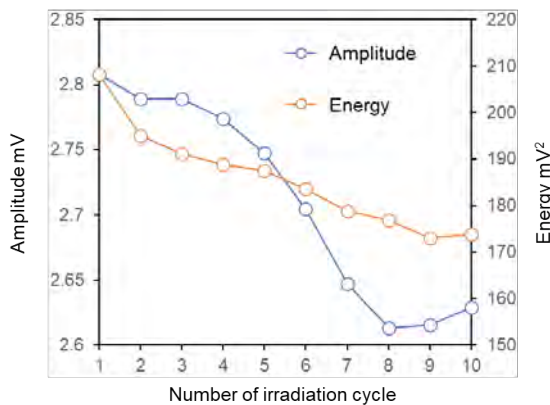
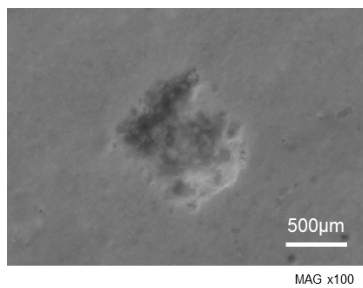
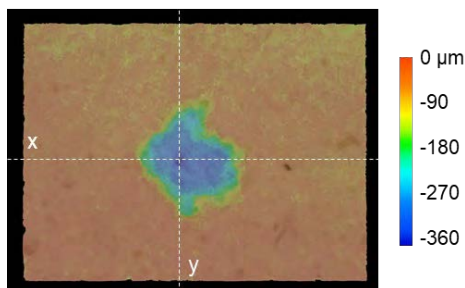


図-3 レーザー照射と AE 計測の概要

図-4 レーザー照射の繰返しによる
振幅およびエネルギーの変化

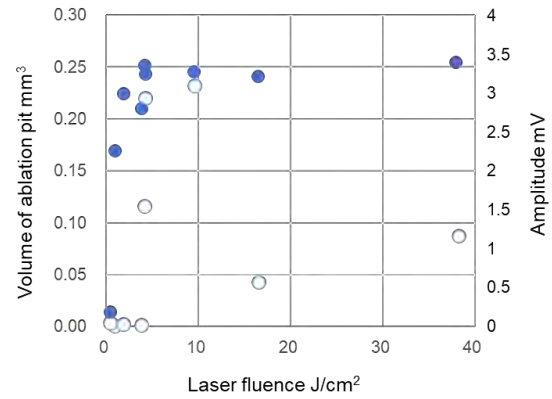
a) 可視光画像



b) 三次元計測結果

図-5 アブレーション痕の観察

図-3 にレーザー照射と AE 計測の概要を示す。なお、レーザーエネルギーは 30~300mJ とし、レーザースポット径は 1~3mm に設定して異なるフルエンスで 10 回のレーザー照射と AE 波の検出を行った。

図-6 レーザーフルエンスがアブレーション痕の形成
と励起弾性波の振幅に及ぼす影響

3. 実験結果

300mJ のパルスレーザー照射を 1mm のスポット径で 10 回繰返した際に検出された AE 波の最大振幅とエネルギーを図-4 に示す。これより、照射回数が増加するごとに検出された AE 波の振幅とエネルギーは低下している。これより、図-2 に概念図を示したアブレーション痕の形成により、繰返し回数が増加することでレーザー照射の表面積が増加し、レーザーフルエンスが低下したために、レーザー誘起弾性波の AE パラメータが変化することが分かる。

上述の結果により形成されたアブレーション痕について、顕微鏡を用いてアブレーション痕の観察を行った。ここでは、1.0 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の分解能で可視光画像と三次元計測を行った結果を図-5 に示す。1mm のスポット径に対し、セメントペースト表面に同等の直径を有する領域で固体表面の構成物質が原子、分子、プラズマ状態となって爆発的に放出された結果であることが確認できる。

レーザー照射のフルエンスを変化させた場合に 10 回の繰返し照射で得られる AE 波の振幅とアブレーション痕の体積を図-6 に示す。これより、形成されるアブレーション痕の体積と励起弾性波の振幅が最大となるフルエンスが存在し、10J/cm² 程度であることがわかる。

4. 結論

セメントペーストに対するパルスレーザーの繰返し照射による励起弾性波の特性について評価を行った結果、10J/cm² 程度でアブレーションに伴うセメント硬化体の欠損と励起弾性波の振幅が最大となることがわかった。

参考文献

- 1) S. Kurahashi, et. al, Demonstration of 25-Hz-inspection-speed laser remote sensing for internal concrete defects, Journal of Applied Remote Sensing, 12 (1), (2018) 015009.
- 2) K. Hashimoto, et. al, Induction and amplification of elastic wave into cementitious material by applied laser ablation technique, Developments in the Built Environment, 12, (2022) 100099.